

**В. І. Сорока, В. А. Онищук, Е. М. Можжухін,
М. В. Арцимович, І. В. Посмітюх, А. Ф. Шаров**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗОНАНСНОГО РОЗСІЯННЯ ПРОТОНІВ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ПАРАМЕТРІВ ПУЧКА ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

Аналізуються особливості та експериментально підтверджується доцільність використання резонансного розсіяння протонів для калібрування енергії пучка електростатичного прискорювача. Експеримент поставлено на тандемному прискорювачі ЕПГ-10К Інституту ядерних досліджень НАН України. Мішенями були кремній та кисень. Мішені кремнію за товщиною були двох типів: повного поглинання та з товщиною, яка за втратами енергії перевищувала ширину вибраного резонансу. Використовувалося пружне та непружне розсіяння на кремнії в межах резонансу при енергії протонів 3,100 МеВ. Мішень кисню, з окисного поверхневого шару на берилії, мала за втратами енергії товщину меншу, ніж ширина пружного, вузького резонансу при енергії протонів 3,470 МеВ. У результаті вимірювань запропоновано поправки щодо енергетичної шкали та розкиду по енергії протонів у пучку прискорювача після його модернізації.

Ключові слова: електростатичний прискорювач, протони, експеримент, використання резонансного розсіяння, мішені кремнію та кисню, контроль параметрів пучка.

Вступ

Енергію іонів електростатичного прискорювача можна легко й плавно змінювати в широких межах. У цьому велика перевага такого типу прискорювачів. Вимоги щодо точності установки енергії прискорених іонів та величини їхньої моноенергетичності можуть суттєво змінюватися залежно від поставленої задачі чи то в області чисто ядерно-фізичних, чи прикладних досліджень. Отже, контроль енергетичних параметрів пучка стає необхідним етапом у процесі експлуатації прискорювача.

Вибір методу контролю диктується, перш за все, вимогами запланованого експерименту. З іншого боку, вибір залежить від наявних технічних можливостей та швидкості, з якою вони можуть бути реалізовані. Найбільш поширений на даний час є метод вузьких (p , γ)-резонансів і порогових (p , n)-реакцій. Первісний список [1] рекомендованих резонансів і реакцій було складено на підставі абсолютних вимірів енергії протонів по їхньому відхиленню в електричному або магнітному полях. Далі з'явився вторинний список, який поповнюється дотепер.

При пружному розсіянні протонів, дейтронів та альфа-частинок на легких ядрах в енергетичному діапазоні від сотень кілоелектрон-вольт до приблизно 10 МеВ спостерігаються також досить вузькі й добре відокремлювані, особливо для ядер зі спіном нуль, резонанси. Але їхнє використання з метою калібрування енергетичної шкали прискорювача ускладнюються. Ситуація в даному випадку подібна до тієї, з якою ми стикаємося

при використанні пружного резонансного розсіяння іонів як методу ядерного мікроаналізу [2]. Причина в тому, що форма цих резонансів не є симетричною. Завдяки інтерференції складових пружного розсіяння (кулонівського, ядерного потенціального та через стадію складеного ядра) форма резонансів залежить від кута розсіяння й повного кутового моменту відповідного рівня складеного ядра. Більше того, енергія резонансу, яка задається в довідникових таблицях, не збігається з енергією частинок, при якій спостерігається максимум перерізу розсіяння. Залежно від ширини резонансу різниця може бути помітною [2]. Проте володіючи експериментальною інформацією з даної області ядерної спектроскопії, можна підібрати цілком прийнятні умови для калібрувальних цілей, а форму пружного резонансного розсіяння вибрати близькою до брейт-вігнерівської. Додаткові зусилля з пошуку необхідних резонансів компенсуються двома перевагами: 1) необхідна для вимірювання апаратура є стандартною і має бути фактично в кожній ядерній лабораторії; 2) завдяки інтерференції переріз резонансного розсіяння в максимумі може зростати в десятки разів, а це значно економить час роботи прискорювача на метрологічні вимірювання при скануванні по енергії в околі резонансу.

Слід зазначити, що в роботах [3, 4] також пропонується пружне резонансне розсіяння протонів для калібрування енергії, але підхід дещо інший. Він базується на комп'ютерному моделюванні спектра при умові, що дані про поперечні перерізи розсіяння на ядрах та гальмівні

© В. І. Сорока, В. А. Онищук, Е. М. Можжухін,
М. В. Арцимович, І. В. Посмітюх, А. Ф. Шаров, 2014

здатності відповідного матеріалу добре відомі. У результаті порівнюються модельований та експериментальний спектри.

Отже, мета даної роботи полягає в тому, щоб, з одного боку, обґрунтувати й експериментально підтвердити доцільність та особливості використання резонансного розсіяння протонів для вимірювання енергетичних параметрів електростатичного прискорювача, з іншого боку, такі дослідження диктувалися нагальною необхідністю проведення метрологічних вимірювань на тандемному прискорювачі ЕПГ-10К ІЯД НАН України після його модернізації.

Експеримент та аналіз результатів

Експеримент виконувався на установці «Каніон» [5], основне призначення якої – дослідження методами ядерного мікроаналізу матеріалів та виробів з них (у тому числі дослідження з використанням орієнтаційних ефектів при проходженні іонів через монокристали). Щоб у даному експерименті запобігти каналуванню, емітенс пучка збільшувався і монокристалічна мішень нахиллялася так, що кут між нормаллю до її поверхні та віссю пучка становив $\sim 7^\circ$. Розсіяні під кутом 165° (лаб.) протони детектувалися поверхнево-бар'єрним детектором. У результаті отримували типові спектри для розсіяння від неорієнтованого кристала.

У цьому дослідженні використовувалося розсіяння протонів на ядрах кремнію й кисню. Спочатку енергія протонів вибиралася в околі резонансного розсіяння на кремнії при $E_p = 3100 \pm 2$ кеВ ($\Gamma = 12,5 \pm 0,5$ кеВ, $\Gamma_p/\Gamma = 0,2$ [6]. Спін і парність (j^π) відповідного рівня складеного ядра ^{29}P дорівнює $7/2^-$. Форма резонансу для рівня з такими параметрами при великих кутах зворотного розсіяння близька до симетричної, а переріз

розсіяння в максимумі збільшується в кілька разів [7]. Було підібрано два зразки кремнію різної товщини. Один зразок мав товщину таку, що протони гальмувалися в ньому повністю. Доцільно було спочатку отримати спектр розсіяння протонів для такої мішені при початковій енергії завідомо дещо більшій за енергію 3,100 МеВ. На рис. 1, а показано один із спектрів такого розсіяння при вибраній енергії з прискорювача 3,150 МеВ. Спектр фактично відображає функцію збудження пружного розсіяння в досить широкому енергетичному діапазоні [6], з урахуванням гальмування й багатократного розсіяння. Можна зразу зорієнтуватися, де ми знаходимося. Пік приблизно в 450-му каналі відповідає розсіянню при 3,100 МеВ. В області приблизно 350-го каналу бачимо мінімум глибокого провалу. Це прояв дуже широкого резонансу при $E_p = 2,880$ МеВ ($\Gamma = 400$ кеВ, $j^\pi = 1/2^-$) [6]. При великих кутах пружного розсіяння в області резонансу з такими значеннями спіну й парності відповідного рівня ядра ^{29}P характерною стає деструктивна інтерференція. В області каналу 180 є ще один пік. Його поява та зникнення корелює з відповідними проявами пружного резонансного розсіяння при $E_p = 3,100$ МеВ. Безумовно, це чисто прояв непружного розсіяння з того ж самого рівня складеного ядра. Непружний пік накладається на пружне розсіяння з глибини мішені. Пік симетричний і це розсіяння можна використати для калібрувальних цілей. Заманливо до того ж розрахувати й виготовити кремнієву мішень такої товщини, щоб пружне розсіяння в області непружного піка зникало повністю. Отже, зникне фон і відпаде необхідність його вирахування. Таку мішень було підібрано. Спектр від неї показано, для прикладу, на рис. 1, б. Прояв пружного розсіяння закінчується приблизно в каналі 300 ($E_p = 3,140$ МеВ).

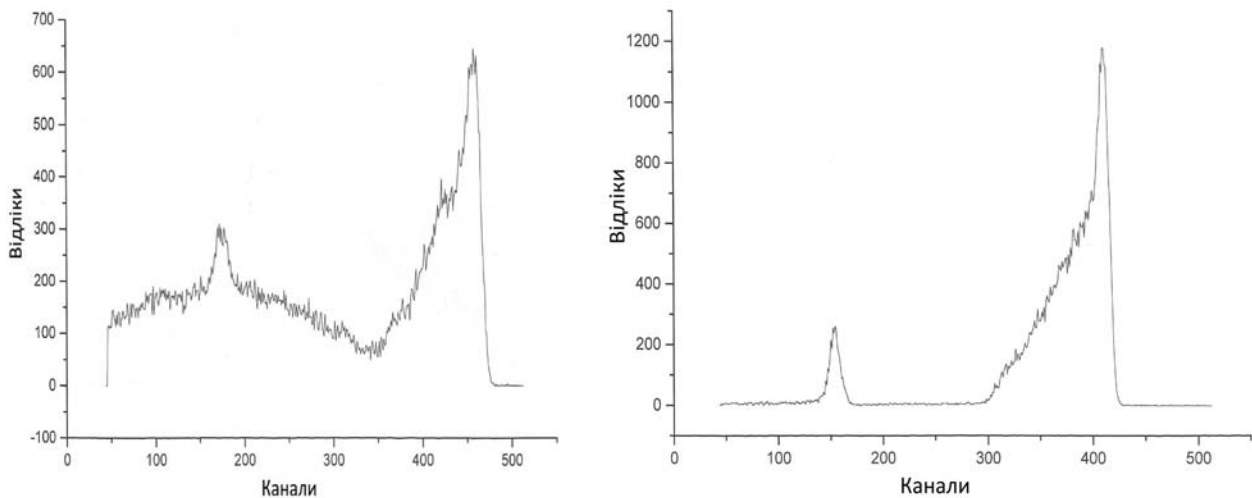


Рис. 1. Спектри зворотного розсіяння протонів від кремнію: а - мішень повного поглинання; б - тонка мішень.

Процедура калібрування енергетичної шкали прискорювача зводиться до сканування по енергії в області вибраного резонансу й вимірювання відносного виходу непружно розсіяних протонів. На спектрах вираховуємо площу (у відліках) під піком резонансного розсіяння для кожної з енергій. Нормуємо до відліків, одержаних від монітора-переривача пучка, сформованого перед входом у реакційну камеру. Будуємо графік залежності відносного виходу від енергії прискорених частинок (рис. 2). По осі абсцис відкладено енергію за шкалою, яка існувала до модернізації прискорювача. Шукаємо середину по висоті схилу кривої виходу. Відмічаємо, що енергія резонансного розсіяння від поверхневого шару мішені кремнію дорівнює 3,114 MeV. Отже, різниця від фактичної енергії резонансу (3,100 MeV) становить приблизно 14 keV.

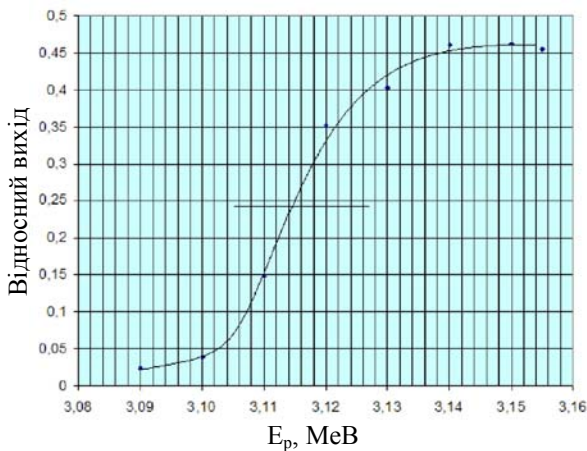


Рис. 2. Енергетична залежність відносного виходу непружно розсіяних протонів на кремнії в області резонансу при $E_p = 3,100$ MeV.

При дослідженні розсіяння $^{16}\text{O}(p, p)^{16}\text{O}$ як мішень ми використовували кисень, який утворює природний окисний шар BeO на поверхні полірованої берилієвої пластинки. Берилій тим добрий, що поверхневий окисний шар досить міцний і не росте при нормальних умовах зберігання, захищаючи берилій від подальшого окислення. Вимірювання товщини окисного шару методом зворотного розсіяння протонів дало для нашої мішені величину $1,24 \cdot 10^{17}$ мол./см². Для цих вимірювань вибиралася енергія, де переріз розсіяння відомий і змінюється плавно. При енергії протонів 3,47 MeV така товщина еквівалентна втратам енергії приблизно 0,46 keV.

На рис. 3 наведено один із спектрів, одержуваних в експерименті. Видно, що спектр розсіяння від кисню чітко відділяється від спектра розсіяння на берилії. Сканування по енергії в області резонансу дає змогу побудувати функцію відносного виходу. Нормування, як і для випадку кремнієвої мішені, здійснюється до відліків від

Для перевірки отриманого результату доцільно провести вимірювання для мішені, товщина якої менша за ширину вибраного резонансу. Більше того, такі вимірювання дозволили б з більшою точністю оцінити енергетичний розкид протонів у пучку. Аналіз літературних даних по пружному розсіянню протонів на ядрах легких елементів у потрібному енергетичному діапазоні показав, що такою мішенню міг би стати кисень [8, 9]. Підходящий для наших цілей резонанс під кутом зворотного розсіяння спостерігається при енергії протонів 3,470 MeV. Його ширина дорівнює $1,53 \pm 0,2$ keV, а спин і парність – 5/2⁻. Для кута розсіяння 165° форма резонансу практично симетрична. Переріз розсіяння зростає в максимумі приблизно в 20 разів.

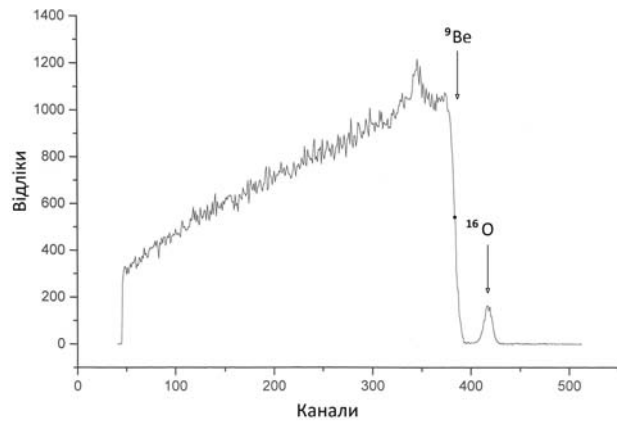


Рис. 3. Спектр зворотного розсіяння протонів від мішені (Be + BeO).

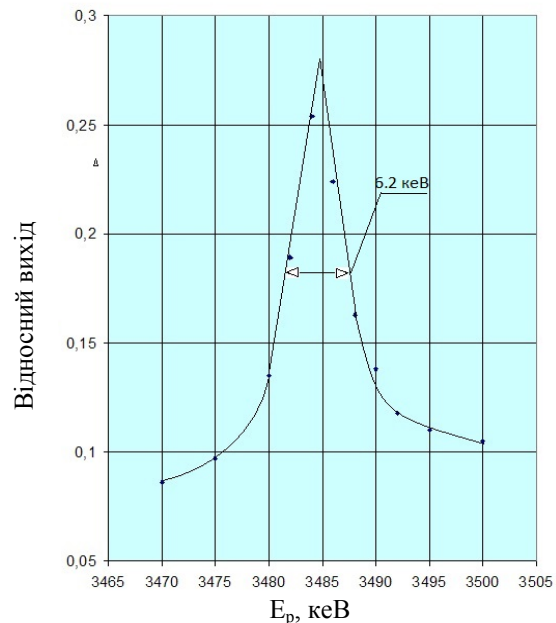


Рис. 4. Енергетична залежність відносного виходу протонів із реакції $^{16}\text{O}(p, p)^{16}\text{O}$ в області резонансу при $E_p = 3,470$ MeV.

монітора-переривача пучка. Залежність від енергії інтегрального виходу протонів із реакції пружного розсіяння $^{16}\text{O}(p, p)^{16}\text{O}$ показано на рис. 4. Бачимо, що пік виходу для тонкої мішені припадає на енергію $\sim 3,484$ МеВ. Отже, різниця від фактичної енергії резонансу (3,470 МеВ) становить приблизно ті ж 14 кеВ і в той же бік, що й у випадку експерименту з мішенню кремнію.

З кривої виходу можна оцінити розкид енергії протонів у даному експерименті. Відомо, що квадрат експериментальної ширини резонансу на половині висоти виходу дорівнює сумі квадратів дійсної ширини, товщини мішені в енергетичних одиницях та енергетичного розкиду в пучку прискорювача. Підрахунок енергетичного розкиду протонів у пучку дає величину ± 3 кеВ.

Висновки

Пружне й непружне резонансне розсіяння іонів може з успіхом використовуватися для метрологічних вимірювань на електростатичних прискорювачах, маючи в окремих випадках свої переваги. Більше того, у випадку використання вузьких резонансів для визначення профілю концентрації певного хімічного елемента в матриці

іншого елемента метрологічні вимірювання такого типу просто необхідні. Це зумовлено тим, що дані відносно параметрів вибраного резонансу беруться з різних літературних джерел з певною похибкою. Енергетичні параметри щодо цього ж резонансу прискорювача, на якому ставиться експеримент, можуть відрізнитися від літературних. Отже, до вимірювання профілю концентрації необхідно визначити, при якій енергії даний вузький резонанс проявляється на даному прискорювачі.

Мішені кремнію й кисню можна запропонувати як еталонні для проведення калібрувальних вимірювань. Самопідтримуючі мішені кремнію різної товщини можуть бути порівняно легко отримані стандартними методами. Тонкі мішені кисню з окисного шару на поверхні берилію також легко доступні. Отримані дані на мішенях кремнію й кисню фактично збігаються в межах похибки щодо положення використовуваних для них вузьких резонансів. Отже, можна задовольнитися лише якоюсь однією мішенню, наприклад кисню. Час неперервної роботи прискорювача для таких вимірювань, при струмі пучка протонів на мішені $5 \div 10$ нА, орієнтовно не перевищуватиме 20 год.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Marion J.B.* Accelerator Energy Calibration // Reviews of Modern Physics. - 1961. - Vol. 33, No. 2. - P. 139 - 137.
2. *Soroka V.I., Artsimovich M.V., Lobach I.Yu. et. al.* Peculiarities of the $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}$ 3,045 MeV resonance scattering and its application to investigation of oxygen in silicon // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. - 1993. - Vol. 83. - P. 311 - 318.
3. *Xie T., Liu J., Fischbeck H. J.* Energy calibration by proton resonance scattering simulation // Thin Solid Films. - 1993. - Vol. 236. - P. 159 - 163.
4. *Healy M.J.F.* Energy calibration by silicon resonance: Completing system calibration with one reference material // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. - 2006. - Vol. 249. - P. 918 - 920.
5. *Artsimovich M.V., Mogilnik I.F., Soroka V.I.* The measuring and calculating complex "Kanion" for researches in the field of the applied nuclear physics. - Kyiv, 1997. - 18 p. - (Preprint / Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Nuclear Research; KINR-97-8).
6. *Belote T.A., Kashy E., Risser J.R.* Excited states in ^{29}P from the scattering of protons by ^{28}Si // Phys. Rev. - 1961. - Vol. 122. - P. 920 - 928.
7. *Soroka V.I.* Selected data on the low-energy ions elastic scattering for the use in nuclear microanalysis. - Kyiv, 1994. - 48 p. - (Preprint / Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Nuclear Research; KINR-94-2).
8. *Ajzenberg-Selove F.* Energy levels of light nuclei $A = 16 - 17$ // Nucl. Phys. - 1982. - Vol. A375, No. 1. - P. 109.
9. *Harris R.W., Phillips G.C., Miller Jones C.* Phase shift analysis of the elastic scattering of proton from oxygen // Nucl. Phys. - 1962. - Vol. 38. - P. 259 - 280.

**В. И. Сорока, В. А. Онищук, Э. Н. Можжухин,
М. В. Арцимович, И. В. Посмитюх, А. Ф. Шаров**

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ ПРОТОНОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Анализируются особенности и экспериментально подтверждается целесообразность использования резонансного рассеяния протонов для калибровки энергии пучка электростатического ускорителя. Эксперимент выполнялся на тандемном ускорителе ЭПГ-10К Института ядерных исследований НАН Украины, после его модернизации. Мишенями служили кремний и кислород. Мишени кремния по толщине были двух типов: полного поглощения и с толщиной, которая по потерям энергии приблизительно равнялась ширине избранного резонанса. Использовалось упругое и неупругое рассеяние на кремнии в области резонанса при энергии протонов 3,100 МэВ. Мишень кислорода, с поверхностного оксидного слоя на бериллии, имела по потерям энергии

толщину меньше, чем ширина избранного упругого узкого резонанса при энергии протонов 3,470 МэВ. В результате измерений предложены поправки относительно энергетической шкалы ускорителя и разброса по энергии протонов в пучке после его модернизации.

Ключевые слова: электростатический ускоритель, протоны, эксперимент, использование резонансного рассеяние, мишени кремния и кислорода, контроль параметров пучка.

**V. I. Soroka, V. A. Onischuk, E. M. Mozzhukhin,
M. V. Artsimovich, I. V. Posmitiukh, A. F. Sharov**

RESONANCE PROTON SCATTERING USE FOR THE BEAM PARAMETERS CONTROL OF THE ELECTROSTATIC ACCELERATORS

The paper discusses peculiarities of the resonance proton scattering use for the beam parameters control of the electrostatic accelerators. The expediency of the use has been confirmed by experiment. Peculiarities are caused because elastic resonance scattering through the stage of compound nucleus is always accompanied by potential and Coulomb scattering. These three components interfere and for that reason the resonance form depends on a scattering angle and total angular moment of a compound nucleus level. However, possessing necessary information in the given field of nuclear spectroscopy enables the selection of resonance with the characteristics suitable for the calibration purpose. Considerable increase of the scattering cross section in the resonance region saves the time and simplifies the experiment technical maintenance. The experiments were performed at the 10 MeV tandem accelerator of the Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, after its modernization. Silicon and oxygen were used as the targets. Silicon targets were of two types of thickness: 1) the target of complete absorption, 2) the target with the thickness in which the loss of protons energy exceeded the width of the selected resonance. The elastic and non elastic scattering from silicon were used in region of the 3,100 MeV proton energy resonance. Oxygen target, as component of the surface oxidizing layer on beryllium had the thickness which in terms of the loss of proton energy was less than the width of the selected elastic narrow resonance at 3,470 MeV proton energy. As result of the measurement the corrections concerning the energy scale of the accelerator and protons energy spread in the beam were proposed.

Keywords: electrostatic accelerator, proton, experiment, resonance protons scattering use, silicon and oxygen targets, beam parameters control.

Надійшла 21.10.2013

Received 21.10.2013